

地すべり対策地下水排除工による自然電位の変化

奥山武彦*・中里裕臣**・黒田清一郎*・竹内睦雄***

目 次

緒言	231	現地試験	234
自然電位	231	1 試験地	234
1 自然電位の成因	231	2 自然電位測定	234
2 自然電位の測定方法	232	3 試験結果と考察	234
流動電位の発生実験	233	結言	236
1 実験方法	233	参考文献	236
2 実験結果	233	Summary	237

緒 言

地下水の流動状態を知ることは、斜面防災、地盤環境分野などでニーズが高く、調査方法として観測井や井戸を利用した地下水位観測、トレーサ法、地下水検層などが主に行われている。面的な流動状況を把握するためには、調査の能率や簡便さが必要となり、1m深地温探査のように地表で行える方法が実施される。すなわち、地下水の流動に伴って生じる地下1mでの温度異常のような、間接的な現象の観測によっている(奥山, 2003)。

電気探査法の1種である自然電位法は、地下の鉱床や地熱水などによって発生する電位を地表で測定する方法であり、これらの地下資源開発のための調査で実施されることが多い(石戸・菊地, 1987)。自然電位の成因の

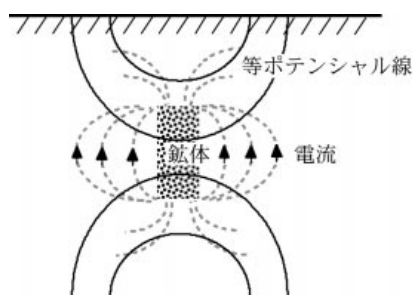


Fig.1 地下の鉱体による自然電位の発生
Self-potential generated by ore body

*造構部土木地質研究室,

**造構部広域防災研究室,

***造構部長

平成17年2月14日受理

キーワード：自然電位，流動電位，地すべり，地下水排除工，
浸透流

ひとつである流動電位が地下水の流動に起因することに着目して、地下水流動調査に応用することができる(竹内, 2001)が、実施例は多くない。本研究では、野外での実施に適する自然電位の測定法の検討を行い、次いで、地すべり対策として地下水排除工が施工された箇所へ自然電位法を適用して、自然電位と地下水流動状況の変化との関係について考察を行った。本研究は科学研究費補助金(14656090)によって実施した。現地試験にあたっては、宮城県築館産業振興事務所、築館町から便宜をはかっていただいたことに謝意を表す。

自然電位

1 自然電位の成因

自然電位の発生原因としては、酸化還元反応、拡散電位、熱電気現象ならびに界面動電現象(流動電位)等があげられる(物理探査学会, 1999)。

地下に存在する鉱体の上部と下部で酸化状態が異なったり、周囲の岩石との違いによって、Fig.1のように鉱体内を上部から下部へ流れる電流が生じると、地盤中に電位差ができる(鉱体電池)。拡散電位は、電解質水溶液中のイオン種の違いによって生じ、熱電気現象は主と

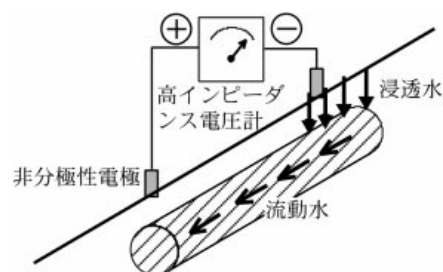


Fig.2 流動電位
Streaming potential

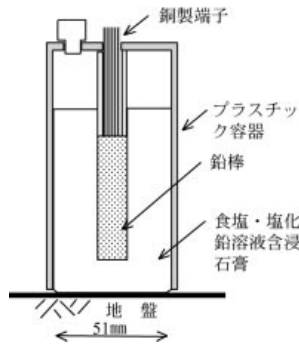


Fig.3 非分極性電極
Non-polarization type electrode

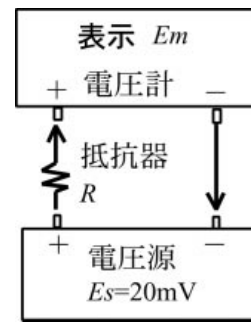


Fig.4 測定器の入力電流の影響を調べる回路
Circuit for testing the influence of input current of voltmeter

Table 1 電極の接地抵抗
Contact resistance between electrode and the ground

土壌・場所	含水比	非分極性電極	銅棒電極
マサ(草地)	19.4%	2886	1759
粘土(水田)	93.2	911	345
ローム(畑)	53.7	2060	
"	64.2	640	

して水溶液中のイオンの熱拡散の違いによるもので、地熱兆候地の自然電位異常のメカニズムとなっている。流動電位は界面動電現象であり、ある2点間で一定の圧力勾配の下での電位差は次のHelmholtz-Smoluchowskiの式で表される(伊藤ら, 1998)。

$$E = PD / \zeta \quad (1)$$

E : 電位, P : 流体の圧力差, D : 流体の誘電率, ζ : ゼータ電位, η : 流体の比抵抗, μ : 流体の粘性係数

多くの岩石では負の値をとる(Ishido, Mizutani, 1981)ので、Fig.2の模式図のように上流側より下流側の方が高電位になる。

2 自然電位の測定方法

a 電極

自然電位は直流であるので、分極現象が生じる金属製電極を使用することができず、非分極性電極を使用する必要がある。非分極性電極としては、液絡によって地盤と導線とを電氣的に接続するタイプの、銅-硫酸銅型、銀-塩化銀型、鉛-塩化鉛型が多く使用される(神代ら, 1961)。本研究で使用した、鉛-塩化鉛型の電極の構造をFig.3に示す。大きさは任意であるが、石膏には飽和量の食塩と塩化鉛の溶液を含浸させる。地盤表面の落ち葉や乾燥土を取り除いて露出させた湿润土に石膏面をよく接触させて使用する。

地表に置いた非分極性電極と地中に打ち込んだ銅棒電極(直径10mm, 長さ400mm)の接地抵抗の測定例をTable 1に示す(奥山ら, 2003)。測定には、LCRメータ(日置電機3522-50型)を使用した。非分極性電極の

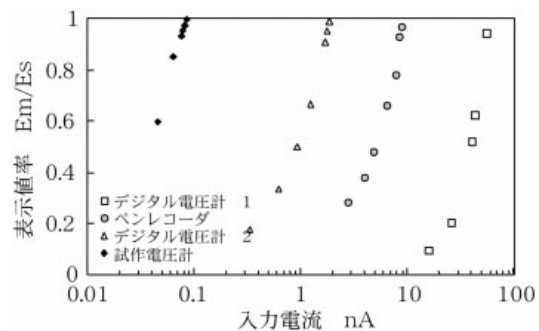


Fig.5 電圧計の入力電流による測定誤差
Measurement error due to input current of voltmeter

接地抵抗は銅棒電極より大きく、また、含水比が低いマサが大きく、含水比が高いロームと水田粘土では小さかった。

b 電圧計

自然電位は、基準とする点と測定点とに於いた非分極性電極間の電位差として測定する。測定対象から電流を消費して影響を与えないように測定するには、零位法による電位差計を使用することが最も望ましい。しかし、電位差計は操作が煩雑であり、野外での使用に適していないので、高感度のデジタル電圧計を使用することが実用的である。しかし、デジタル電圧計やペンレコーダはわずかながらも入力電流を消費するので、それを制限した場合には測定誤差が増大する。入力電流が電圧計の表示値に及ぼす影響を、Fig.4のように、出力抵抗が極めて小さい定電圧装置と電圧計との間に挿入した抵抗器の値を増大させることによって調べた。定電圧装置の出力電圧 E_s と入力電流の制限を受けた電圧計の表示値 E_m との比を、市販のデジタル電圧計2種とペンレコーダ、特に入力電流の小さな回路で試作した電圧計について、Fig.5に示す。機種によっては、数十nAの電流が流れないと表示値が過小なものとなり、正しい電圧を測定できないことがわかった。自然電位のような微弱信号の測定の際に入力電流が大きいことは、系を乱すことになるので、本研究での測定には、入力電流の小さい、

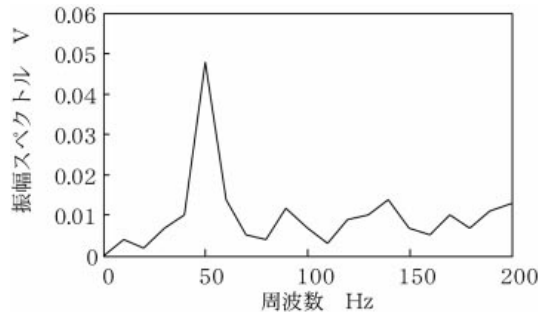


Fig.6 地盤電位のパワースペクトル (水田)
Power spectrum of ground current (paddy field)

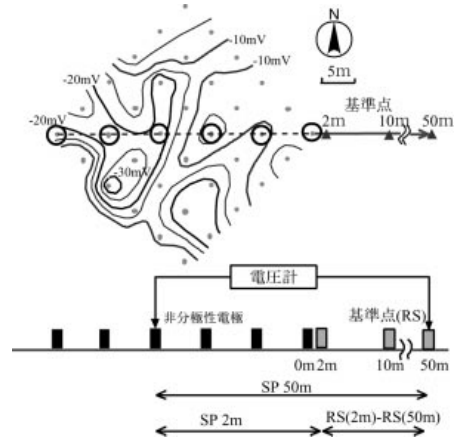


Fig.7 基準点位置の影響を調べるための測点配置
Location of measurement and reference stations

Fig.5のデジタル電圧計2または相当品，試作電圧計を使用した。

c 地盤電位の雑音成分

地盤中には、自然電位以外に、磁気嵐などによって引き起こされる地電流や商用電源の接地電流が流れており、これらは自然電位測定にとっては無用な雑音成分となる。市街地、農村地帯および山中において測定した地盤電位のスペクトル解析を行った。交流成分を対象とするので、銅棒電極を20m離して打ちこみ、10kHzのサンプリングを行った。測定とスペクトル解析には、ナショナルインストルメント社製ADコンバータ6024Eと松山アドバンス社製LaBDAQを使用した。

茨城県友部町の農村集落近くの水田では、電圧実効値が0.154Vであり、電圧パワースペクトルはFig.6に示すように、商用電源の周波数である50Hz成分が卓越していた。土浦市内の市街地では実効値0.137Vであった。一方、人里離れた筑波山系足尾山中では電圧実効値が0.014Vと低かった。数Hz以上の成分はローパスフィルターによって十分に雑音レベルを低減させることが可能であるが、測定に際してはデータの質に注意を払う必要がある。

d 基準点位置の影響

自然電位を基準点に対する相対的電位として測定する上で、基準点の取り方の影響を明らかにしておく必要がある。

農業工学研究所畑地灌漑実験圃場でFig.7のように5m間隔で6×6点の測定点を設置して自然電位を測定した。東西対角線を東へ50m延長した点を基準点とした自然電位は東側が高く、西側が低くなっている。基準点を東西対角線の東端から50m、10m、2mの点にした場合の対角線上の6点の電位、50m基準点に対する10m、2m基準点の電位は、Fig.8のように変化した。基準点を変えたことによる各測定点の電位の差は、基準点間の電位の差 [10m基準点 - 50m基準点] = 3.6mV, [2m基準点 - 50m基準点] = 7.7mVとほぼ一致した。また、東西対角線上では、2m基準点と10m基準点の間に自然電位が最大となる領域があるようである。直線上では基

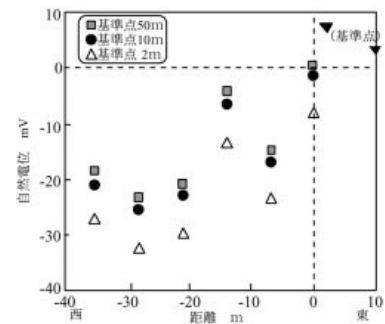


Fig.8 基準点位置による自然電位の変化
Change of self-potential according to reference stations

準点の位置は任意にとってよいが、測定値は基準点の電位に依存して変化する性質がある。

流動電位の発生実験

1 実験方法

土中の浸透現象に伴う流動電位の発生を砂カラムを用いた室内実験で検証した。

実験装置をFig.9に示す。カラムには内径83mm、長さ600mmの硬質塩化ビニル製パイプを使用し、両端に目の開き0.105mmの網を取り付けた。カラム内に豊浦砂を水締めで充填して、乾燥密度1.59g/cm³を得た。上流側のマリOTTタンクの高さを可変し、下流側の定水位水槽との間で一定の水頭差を保って砂カラムに定常飽和浸透流を発生させた。砂カラムの外側から直径8mmの小型鉛 - 塩化鉛非分極性電極を差し込んでデジタルテスターで電位差を測定した。

2 実験結果

300mm離れた2点間の電位差と、上下流の水頭差hと砂カラム長Lとの比で表す動水勾配との関係をFig.10に示す。流動電位以外の電位成分も含まれると考えられる

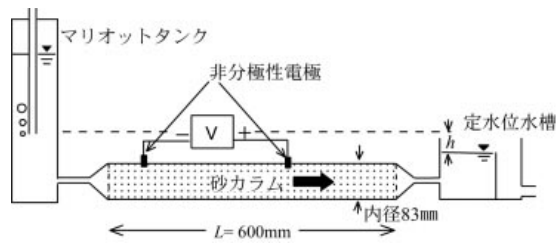


Fig.9 砂カラムを用いた流動電位の実験
Experiment on streaming potential using sand column

が、下流側が上流側より高電位となり、動水勾配にほぼ比例する電位差が測定されたことから、流動電位に関する(1)式を実験的に確認することができた。

現地試験

1 試験地

2003年5月26日、宮城県沖を震源として発生した地震の際に、宮城県築館町内で地すべりが発生した。現地は鬼首火山の火砕流堆積物からなる丘陵地で、地表は草生化している。地すべりは南北方向の旧地形の個所で最大幅40m、長さ約70mにわたって崩落し、移動土塊の厚さは3~5m程度であった(日本地すべり学会調査団, 2003)。Fig.11に現況地形と旧地形の等高線、崩壊部を示す。旧地形はY字形をしていて、東側の谷頭部付近が地すべりの滑落崖になっていることがわかる。災害後にサウンディングと調査ボーリングが行われ、対策工として集水井(深さ約7m)、集水井からの集水ボーリング(上段8本、下段17本、長さは35~50m)、地表排水路等が2004年3月に完成した。

現地は30年余前に切盛土工されており、平均傾斜は約11度と緩い。冠頂から北方の分水界までの距離は約100mと短く、集水域は狭い。多量の先行降雨もなかったが、崩壊後の滑落崖脚部に湧水が見られたことから、不飽和状態で保水されていた水が地震動によって自由水化したことで土のせん断抵抗力を失ったことが地すべりの原因として推定された(地盤工学会・土木学会, 2003)。

筆者らは、盛土層内の水分動態を解明する目的で、2003年11月にFig.11に観測点として示す位置に雨量計、間隙水圧計(深度0.6, 2.1, 6.1m)ならびに地震加速度計を設置して連続観測を開始した(奥山ら, 2004)。ボーリングで採取した試料の透水試験、保水性試験を行った結果、火山灰質土主体であるが、表層1.5mは大間隙に富む層で、その下層がやや緻密で透水性が小さい構造になっている。

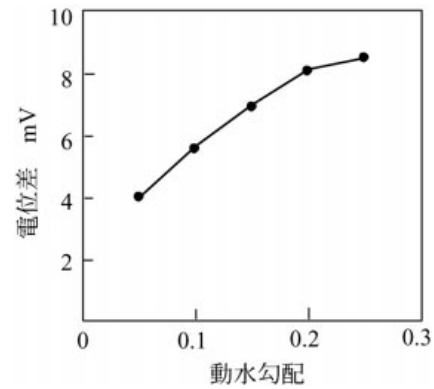


Fig.10 砂カラムで発生した電位
Potential observed in sand column

2 自然電位測定

自然電位の測定は、崩壊部上部の南北約100m、東西約150mの範囲を対象として、対策工施工前の2003年12月と施工後の2004年6月に行った。

非分極性電極には鉛-塩化鉛型石膏電極を使用し、調査範囲南西側に設けた電位基準点からビニル電線を延伸して測定点との間の電位差を小型デジタル電圧計を用いて測定した。約100点の測定には半日程度を要した。試験地には鉱床や温泉がなく、電力線からも離れているため、ノイズの影響が少ない条件である。見通しのきかない藪もあり、測定点を均一に配置することは困難であったので、ある程度自由配置として位置を中波ビーコンによるDGPSを使用して決定した。測位誤差は1m程度であり、測定が簡便である自然電位法の長所を活かすことができた。そのために測定点の位置は2時期で同一ではないが、基準点は同位置であり、2時期の電位分布の差に着目することによって2時期に共通の電位発生要因を除くことができる。

各測定点の自然電位は測定点の座標値とともにGISに入力し、現地の現況地形図、空中写真、旧地形などの情報とともに整理した。

3 試験結果と考察

a 自然電位分布

実測値を基にクリギング法で補間した自然電位分布図をFig.12に示す。2003年12月の自然電位分布を見ると、地すべり冠頂から北方にかけて高電位になっている。調査範囲北西側斜面上部が低電位になっていることから、浸透現象の上下流と流動電位との関係を適用すると、斜面上部から地すべりの発生場に向かう浸透流があったことが推察される。

地下水排除工が施工された2004年6月には、全体的に電位が低下した(全域平均で-8.5mV)。2003年12月と2004年6月の電位の差を、集水井と集水ボーリングの位置とともにFig.13に示す。薄色部が示す自然電位の低下域は、集水ボーリングの施工範囲と重なっているこ

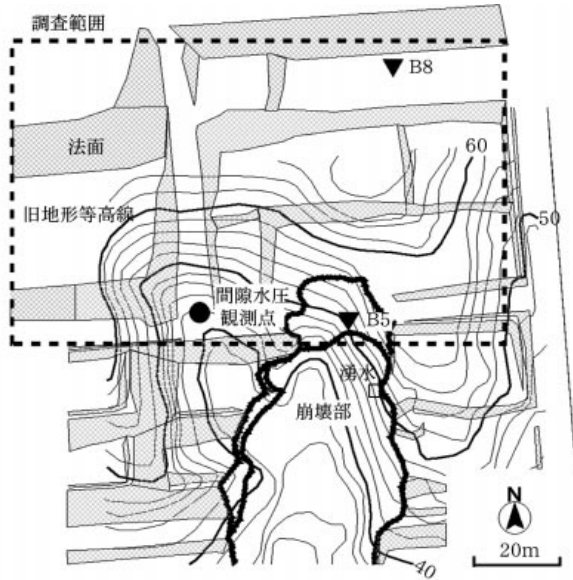


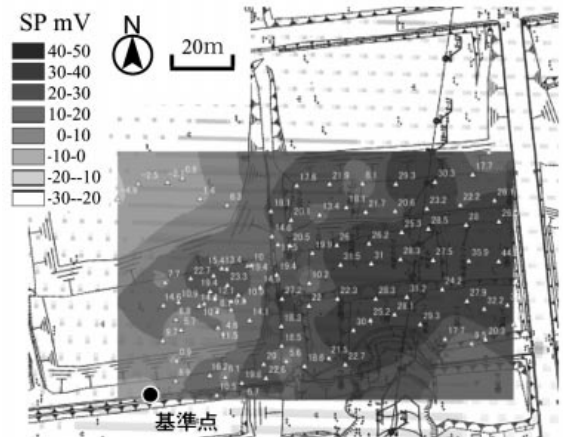
Fig.11 試験地の地形
Topographical map

とから、この領域で地下水の流動状況に変化があったことが考えられる。

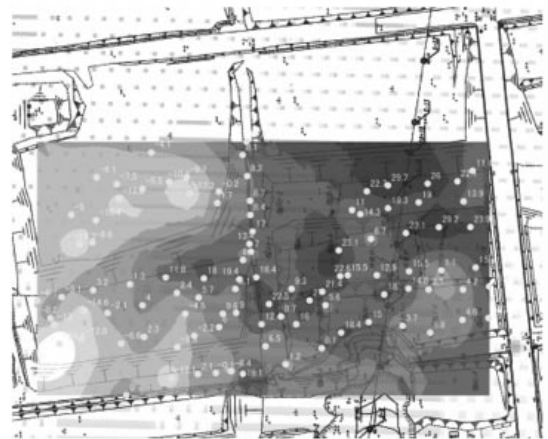
前述のように、地表から3～5mの深さの滑落崖脚部に湧水が見られたことから、地下水位はもともと浅かった。集水ボーリングが深度5～10mに施工されて地下水ポテンシャルが低下したために、地下水の流動方向が集水ボーリングに向かうように変化した結果、地表の電位が低下したことが考えられる。集水ボーリングからの実排水量の測定は行っていないが、2004年10月の観察では、一帯の地下水位は低下していたため、下段の集水ボーリングからの排水が見られ、排水量が多かった管が配置されている北西～北方向は、Fig.13の電位低下範囲に含まれている。

斜面上方にあるボーリングB8と、集水井に近いB5（位置はFig.11参照）の孔内水位の変化をFig.14に示す。地下水排除工によってB5の水位が約5m低下したが、斜面上方のB8には変化が見られない。B8とB5との間の60mでの水位勾配は、2003年12月の0.15から2004年6月の0.21まで増大した。B8とB5の近傍の測定点間60mの自然電位差が、-5.3mVから-13mVへと増大したことは、水位勾配の増大現象と符合する。(1)式で電位は流体の圧力差に比例することとなっているが、水位勾配の変化以上の電位差変化になったことは、斜面に沿った流れ以外に、集水ボーリング施工領域で浅部から地下の集水ボーリングへ向かう下向き浸透が促進されたためと考えられる。Fig.13では、調査範囲北端部の法尻付近に電位増大個所が発生しているが、降雨の後の局所的な浸透などの現象があることが考えられる。

間隙水圧観測点の埋設間隙水圧計では、地下水排除工の施工前後で深度0.6mの水頭変化はないが、深度6.1mの水頭は1m以上低下している（奥山ら，2004）。



2003年12月



2004年6月

Fig.12 自然電位の測定点と電位分布図
Self-potential distribution

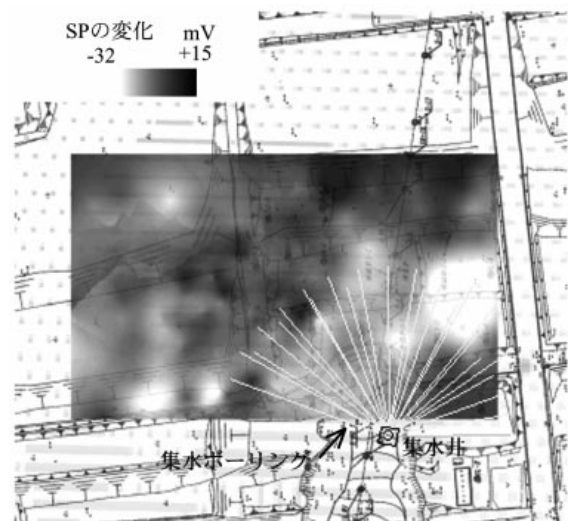


Fig.13 2003年12月と2004年6月の自然電位の差
Self-potential difference between Dec. 2003 and June 2004

これらのことから、集水ボーリングの集水機能によって地中の間隙水圧を低下させ、崩壊危険度を低減させる効果を発揮していると考えられる。

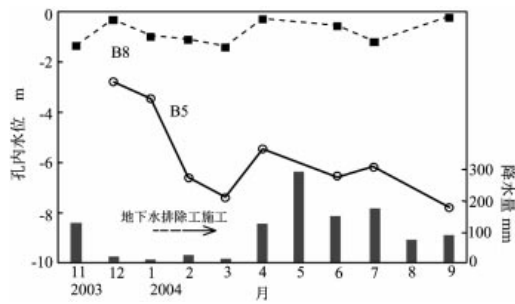


Fig.14 観測井の孔内水位
G.W.L. at observation wells

結 言

自然電位法は物理探査的調査法の中でも簡便な方法であり、これまで地下の鉱床や熱水を対象とした広範囲の探査に多く使われてきた。

しかし、流動電位のような地下浅部の現象も反映していることから、より広範な応用が可能であると考えられる。そのためには、自然電位の発生に関わるメカニズムの一層の解明が必要である。面的なデータを容易に取得できるので、GPSによる位置情報とあわせてGISを用いた解析に適する。

地下水排除工は地すべり対策として最も多く実施されている工種であるが、その効果の遡及範囲を明らかにすることはなかなか困難である。地上探査手法である自然電位法によって、地下水流動の面的な変化を間接的にも捉えられたことは、今後、対策工の施工計画や崩壊危険個所の抽出への応用が期待される。

参考文献

- 1) 物理探査学会 (1999) : 物理探査ハンドブック, 247
- 2) Tsuneeo Ishido, Hitoshi Mizutani (1981) : Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophysical Research*, 86(3), 1763-1775
- 3) 石戸経士・菊地恒夫 (1998) : 自然電位法, 地熱エネルギー, 12 (4), 47-65
- 4) 伊藤芳朗・楠見晴重・竹内篤雄編 (1998) : 斜面調査のための物理探査, 106-134, 吉井書店
- 5) 地盤工学会災害連絡会議・土木学会合同緊急調査団 (2003) : 平成15年5月26日に宮城県沖で発生した地震災害緊急調査速報, 土と基礎, 51 (8), 44-48
- 6) 神代健夫・陶山淳二・長谷川 淳 (1961) : 自然電位測定上の問題, 物理探査, 14 (1), 43-47
- 7) 日本地すべり学会調査団 (2003) : 三陸南地震時に発生した宮城県築館町の高速長距離運動型の土砂崩れ現象, 日本地すべり学会誌, 40 (2), 45-46
- 8) 奥山武彦 (2003) : 1m深地温探査法, 地球環境調査計測事典 第2巻 陸域編, 644-649, フジテクノシステム, 東京
- 9) 奥山武彦・中里裕臣・黒田清一郎 (2003) : 自然電位探査の測定法について, 第54回農業土木学会関東支部大会講演会講要, 59-61
- 10) 奥山武彦・中里裕臣・黒田清一郎 (2004) : 宮城県築館地すべりの間隙水圧観測結果, 第43回日本地すべり学会講要, 69-70
- 11) 竹内篤雄・中山健二・渡辺知恵子 (2001) : 温度を測って地下水を診断する, 21-49, 古今書院, 東京

Change in Self-potential Due to Groundwater Control Works for Landslide Prevention

OKUYAMA Takehiko, NAKAZATO Hiroomi, KURODA Seiichiro and TAKEUCHI Mutsuo

Summary

Self-potential exploration is a simple technique for observing electric potential in the ground. Non-polarization type electrodes using lead - lead chloride solution and a high input impedance voltage meter were used to measure self-potential in this study. Streaming potential is one origin of self-potential related to soil water movement. Generation of streaming potential was verified by an infiltration test with a sand column. Field observations of self-potential were conducted at a slope landslide before and after groundwater control works were completed. Self-potential values decreased around drainage pipes after groundwater control work. Groundwater level was lowered by groundwater control works and induced water movement toward the drainage pipes at depths of 5 and 10 meters below the ground surface. The reason for the decrease in self-potential around drainage pipes is thought to be caused by downward water seepage.

Keywords : self-potential, streaming potential, landslide, groundwater control works, seepage